ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.791.754.002

Ю.Г.ЛЮДМИРСКИЙ, В.Ф.ЛУКЬЯНОВ, С.В.ЖАК

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ИХ СВАРКЕ НЕАДАПТИВНЫМИ РОБОТАМИ

Рассмотрены факторы, влияющие на качество сварных соединений, выполненных неадаптивными роботами. Разработана имитационная модель прогнозирования качества сварных соединений. Модель позволяет выявить влияние доминирующих факторов и определить пути совершенствования технологии роботизированной сварки

Ключевые слова: *роботизированная сварка, качество, отклонения электрода от стыка, программирование робота, схема базирования, область качества, статистические данные.*

Введение. Роботизация дуговой сварки представляется как одно из перспективных направлений развития сварочного производства. Вместе с тем одной из серьёзных проблем, с которыми приходится сталкиваться при дуговой сварке неадаптивными роботами, является проблема обеспечения точности направления конца электрода по стыку [1, 2], что в основном определяет качество сварного соединения. Опыт ведущих фирм в области роботизации дуговой сварки показывает, что из-за трудности решения этой проблемы только 70% разработанных робототехнических комплексов (РТК) доводятся до внедрения.

Постановка задачи. На точность направления конца электрода по стыку, как отмечается в работе [3], оказывает влияние большое количество факторов. Наиболее значимые из них: отклонения формы и линейных размеров деталей, входящих в рассматриваемую сборочную единицу; точность выполнения сборочно-сварочной оснастки; точность вспомогательных средств, предназначенных для установки изделия в удобное положение для сварки; жёсткость приспособлений и усилия, развиваемые зажимными механизмами приспособлений; величины временных перемещений и остаточных деформаций, возникающих в процессе сварки; точность позиционирования робота; отклонения, связанные с оснасткой робота (качество рихтовки проволоки, износ токоподводящего мундштука), а также величина зазора в стыке b, которая в основном зависит от выбранной схемы базирования деталей в приспособлении и точности изготовления деталей. Параметры перечисленных выше отклонений имеют случайный характер.

Таким образом, задача оценки возможности сварки роботом рассматривается как задача обеспечения заданного качества сварного соединения, сформулированная в терминах допустимых отклонений электрода от линии свариваемого стыка в системе «изделие – оснастка для сборки и сварки – манипуляционная система изделия – робот – оператор».

Методы исследования. Методика оценки возможности получения качественных соединений при использовании неадаптивных роботов для дуговой сварки основана на выявлении факторов, влияющих на точность сборки, установлении зависимостей отдельных составляющих погрешностей от этих факторов, суммирования составляющих погрешностей и сравнении полученных результатов с допустимыми значениями. Схема такой оценки показана на рис.1.

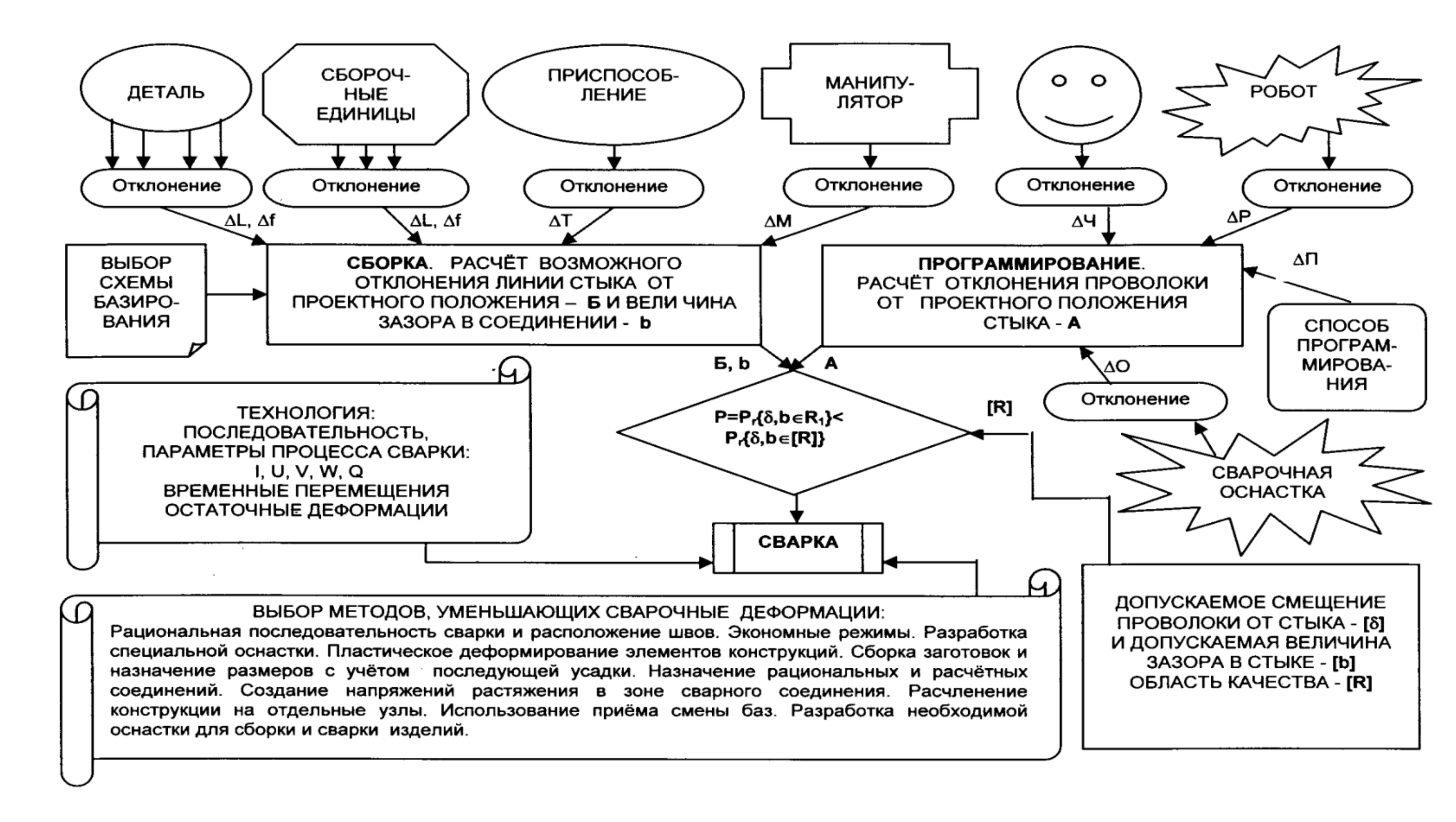


Рис.1. Схема оценки возможности получения качественных соединений при использовании неадаптивных роботов для дуговой сварки

Отклонения размеров, влияющих на качество сварного соединения, выполняемого роботом, разделены на две группы:

- к первой группе относятся отклонения, связанные с работой робота, снабжённого сварочной горелкой, и вызывающие смещение электрода от проектного положения (обозначим «А»);
- ко второй группе относятся отклонения, вызывающие смещение линии сопряжения свариваемых кромок от проектного положения (обозначим «Б»).

Отклонение электрода от проектного положения является функцией случайных величин, зависящих от робота, его оснастки и оператора - программиста:

$$А = f (\Delta р; \Delta ч; \Delta э; \Delta и; \Delta п),$$

где $\Delta р$ - отклонение, связанное с точностью позиционирования робота; $\Delta ч$ – отклонение проволоки от проектного положения, вызванное неточностью при программировании робота (человеческий фактор); $\Delta э$ – отклонение оси электродной проволоки от оси горелки, вызванное некачественной рихтовкой проволоки; $\Delta и$ – отклонение, связанное с износом тракта подачи проволоки; $\Delta п$ – отклонение, связанное с различными способами программирования.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Отклонения $\Delta р$, связанные с точностью позиционирования роботов для дуговой сварки, в том числе и для использованного в данной работе ПР 161/15, по паспортным данным составляет ± 0,2 мм. В настоящее время появились роботы типа «MOTOMAN», точность которых уже достигает ± 0,08 мм.

Установлено [5], что в цеховых условиях, при хорошей освещённости и умеренной комфортности работы оператора, отклонения проволоки от стыка $\Delta ч$ (человеческий фактор) подчиняются нормальному закону, который можно характеризовать: М = 0,237 мм; σ = 0,335 мм.

Наши исследования показали, что отклонение конца электрода $\Delta э$ от оси горелки колеблется в пределах ± 0,15 мм при вылете электрода 15...18 мм.

При определении ресурса токоподводящих наконечников в качестве критической величины износа было принято увеличение диаметра канала, по которому подаётся проволока, на 0,2 мм. Износ токоподводящего наконечника увеличивает возможное отклонение проволоки от оси горелки на ± 0,1 мм.

Если программирование ведётся по деталям, взятым случайным образом из партии, то $\Delta п$ может меняться в диапазоне колебания размеров деталей. В том случае, когда детали уже изготовлены и имеются статистические данные по вариации размеров, то программирование представляется целесообразным вести не по произвольно взятым деталям, а по деталям, размеры которых близки к математическому ожиданию или по специально изготовленным шаблонам, размеры которых близки к номинальным размерам деталей. В этом случае величина $\Delta п$ уменьшается практически до нуля.

Ко второй группе относятся отклонения, вызывающие смещение линии сопряжения свариваемых кромок от проектного положения. Величина «Б» зависит от схемы базирования и выражается функцией:

$$Б = \Psi (\Delta M; \Delta L; \Delta f; \Delta T),$$

где ΔM – отклонение, связанное с точностью установки детали в рабочее положение и зависит от точности работы используемого программируемого манипулятора, которая обычно, как и у роботов, составляет ± 0,2 мм; ΔL, Δl – отклонения линейных размеров тех деталей, кото-

рые влияют на положение линии соединения и величину зазора в соединении; Δf – отклонение формы детали, влияющее на положение линии соединения и величину зазора в соединении; ΔТ – отклонение линии соединения изделия, вызванное погрешностями изготовления сборочно-сварочной оснастки.

Величину возможного смещения свариваемых кромок от проектного положения «Б» и величину зазора «b» в соединении можно рассчитать, зная схему базирования изделия в приспособлении. В связи с этим в банк данных имитационной модели введены различные схемы базирования соединений и алгоритмы определения «Б» и «b». Величины возможного смещения стыка в пространстве «Б» и зазора «b» в соединении представлены в таблице.

Влияние схем базирования на отклонение стыка
от его проектного положения – **Б** и величину зазора – **b** в соединении

Номер схемы	Схемы базирования	Отклонение стыка от проектного положения – Б и величина зазора – b, мм
1	b→0; P; T±Δт; l±Δl	$Б = \Delta l_{сл} + \Delta T_{сл}$ $b \to 0$
2	P; b; P; l±Δl; L±ΔL; T+Δт	$Б = (\Delta l_{сл} - \Delta L_{сл})/2$ $b = \Delta l^{B} - l_{сл} + \Delta L^{B} -$ $- L_{сл} + \Delta T^{B} - \Delta T_{сл}$
3	b=const; P; P	$Б = 0$ $b = const$
4	1; 2; b; P; T±Δт; l±Δl; L±ΔL	$Б_1 = \Delta l_{сл} + \Delta T_{сл}$ $Б_2 = \Delta l_{сл} + \Delta L_{сл} + \Delta T_{сл}$ $b \to 0$
5	1; 2; b; T±Δт; l±Δl; L±ΔL	$Б_1 = Б_2 = \Delta l_{сл} + \Delta T_{сл}$ $b \to 0$
6	H±Δн; 1; P; 2; P; T±Δт; L±Δl	$Б_1 = \Delta T_{сл} + H_{сл} \cdot f/100$ $Б_2 = \Delta T_{сл} - \Delta L_{сл} + H_{сл} \cdot f/100$ $b \to 0$
7	1; P; 2; P; L±Δl; T±Δт	$Б_1 = \Delta T_{сл} + \Delta L_{сл}$ $Б_2 = \Delta T_{сл}$ $b \to 0$

В приведенных формулах $\Delta l^{в}$, $\Delta L^{в}$, $\Delta l_{сл}$, $\Delta L_{сл}$ соответственно верхние и случайные отклонения собираемых деталей; f – допускаемое отклонение сортового проката от перпендикулярности (для уголков, швеллеров и другого сортового проката допускается отклонение 1 мм на длине 100 мм); $T^{в}$, $T_{сл}$ и $H_{сл}$ – соответственно верхнее и случайные отклонения размеров установки базирующих элементов в приспособлении (см.табл.).

В схемах базирования (№1-№7) погрешность приспособления $\Delta T_{сл}$ можно не учитывать, если приспособления на РТК установлены стационарно, и для каждого приспособления составлена своя программа сварки. Это объясняется тем, что программирование сварки ведётся по собранному изделию в уже готовом приспособлении. Поэтому отклонения размеров фиксаторов, проставленных на сборочном чертеже или полученных при изготовлении приспособления, не оказывают влияния на величину возможного смещения проволоки относительно стыка соединения.

В тех случаях, когда по технологическому процессу неизбежна смена сборочно-сварочной оснастки, используемой совместно с роботом, величину $\Delta T_{сл,}$ (см. табл.) можно не учитывать, но при этом для каждого из сменных приспособлений необходимо разработать индивидуальную программу, а в алгоритм работы РТК ввести специальный код, распознающий приспособление и выбирающий соответствующую программу.

С точки зрения роботизации сварки наиболее перспективными являются:

- схема № 3 (базирование по ножу), так как в этом случае смещение кромок от проектного положения практически стремится к нулю (Б=0), а величина зазора *b* может равняться толщине ножа;

- схема № 5 (схема базирования со сменой баз). Она обеспечивает зазор b практически равный нулю и небольшое отклонение величины Б, равное величине погрешности изготовления только одной крайней детали $\Delta l_{сл}$.

Величины «δ» и «b», поля их рассеяния образуют область R. Качество сварки обеспечивается при условии $\{R \in [R]\}$, где [R] - «область качества», которую можно определить экспериментально.

Вероятность *P* изготовления качественных сварных швов определяется условием:

$$P = P_r\left\{\delta, b \in R_1\right\} < P_r\left\{\delta, b \in \left[R\right]\right\}.$$

В работах [4, 5] приводятся методики определения допустимого отклонения линии соединения от заданного положения электрода при сварке и [R] в основном для отрасли автомобилестроения. Согласно этим методикам для отрасли сельхозмашиностроения были определены «области качества» [R] для тавровых соединений, выполненных катетами 3, 4, 5 и 6 мм. На рис.2 показаны соответствующие «области качества» для тавровых соединений, выполненных из пластин толщиной 4 мм, сваренных «в угол», и режимы сварки, при которых они получены.

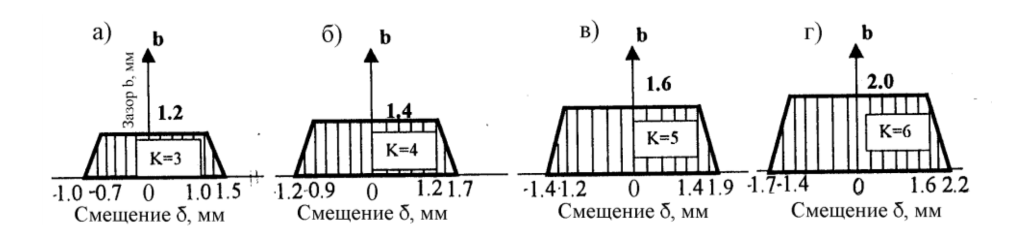


Рис.2. Области качества тавровых соединений, выполненных в нижнем положении «в угол», катетами: а – К=3 мм; б – К=4 мм; в – К=5 мм; г – К=6 мм. Режим сварки: проволока Св-08Г2С – ∅ 1,2 мм; напряжение на дуге U = 28 В; ток I=240 А; вылет электрода - 16 мм; расход углекислого газа Q=14…18 л/мин; различные величины катетов – 3, 4, 5, 6 мм получали за счет изменения скорости сварки, соответственно, Vсв= 70, 44, 30 и 20 м/ч

Вероятность получения качественных сварных соединений *P* и соединений, не соответствующих нормативной документации (*1-P)*, определяли с помощью имитационного моделирования на ЭВМ, генерируя случайные величины датчиками псевдослучайных чисел для каждого случайного параметра, отражающих законы распределения величин, влияющих на величину зазора в соединении и на величину отклонения проволоки от стыка и подсчитывая процент попадания точек в «область качества» [R].

В результате многократной прогонки модели определяют вероятность получения качественных сварных соединений, выполненных неадаптивными роботами. Подобные расчёты следует выполнять на всех этапах проектирования, начиная с разработки технического задания и заканчивая внедрением и обслуживанием РТК.

На рис.3 показана экранная форма модели, которая даёт наглядное представление о введенной исходной информации, количестве назначенных прогонов модели, «области качества» для данной величины катета. В результате расчёта на экран выводится процент выхода качественных сварных соединений.

В качестве исходной информации для имитационного моделирования используются результаты экспериментов, которые описывают случайное рассеяние основных параметров в виде соответствующих законов распределения, а также зависимости между параметрами, которые влияют на отклонение электрода от реального положения стыка. В тех случаях, когда расчёт возможности обеспечения качественной сборки под роботизированную сварку производится на ранних этапах проектирования, или когда имеются только чертежи деталей с номинальными размерами и их отклонениями, можно принять, что геометрические погрешности распределены нормально [6, 7] с математическим ожиданием, равным номиналу размера, а средние квадратические отклонения σ рассчитывать по приближённой зависимости:

$$\sigma = \left(\Delta^{B} + \Delta_{H}\right)/6\,,$$

где $\Delta^{в}$ и $\Delta_{н}$ соответственно верхнее и нижнее отклонения.

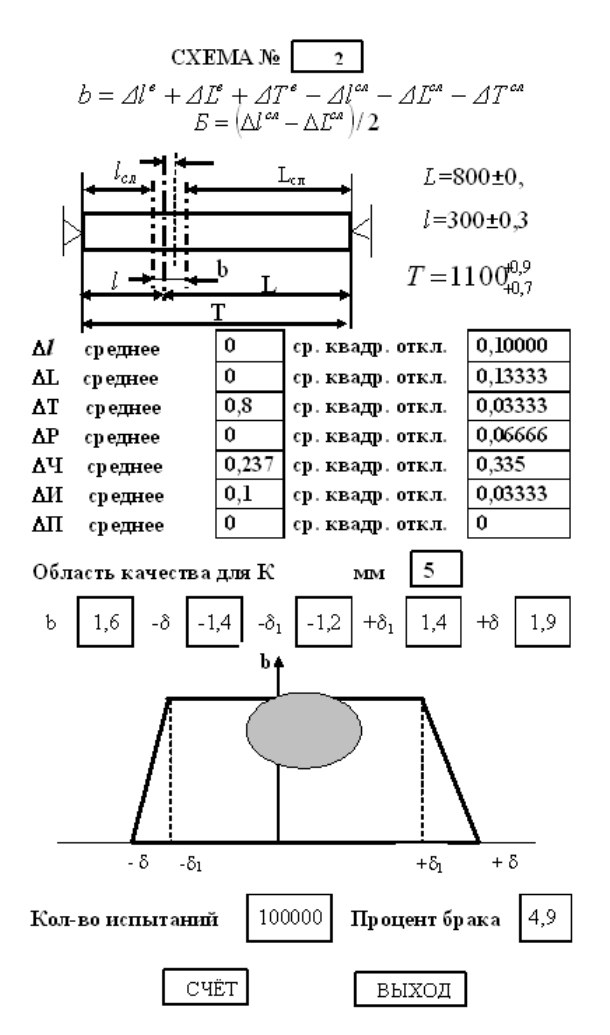


Рис.3. Пример ввода исходных данных
и результат расчёта выхода качественной продукции
при базировании деталей по схеме № 2

Кроме того, в качестве исходной информации в зависимости от требуемой величины катета шва вводится соответствующая область качества. На основе знания законов распределения отклонений размеров изделия, приспособления, манипулятора, робота, сварочной оснастки робота, выбранных способов программирования и возможных ошибок при программировании с помощью датчиков случайных чисел определяются текущие значения отклонений всех вышеназванных величин. Затем, при каждом прогоне модели, рассчитываются случайные величина «δ» и «**b**» и анализируется процент принадлежности указанных величин «области качества». В результате многократной прогонки модели ($10^5 \ldots 10^6$) определяется процент получения качественных сварных соединений при заданных значениях исходных отклонений размеров. Рис.3 не просто демонстрирует методику работы модели, но одновременно является конкретным примером решения при заданных условиях.

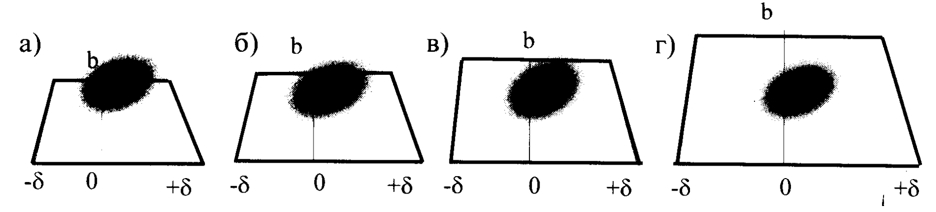


Рис.4. Влияние величины катета шва на выход качественной продукции:
а – К=3 мм – 56,3 %; б – К = 4 мм – 81,4 %; в – К = 5 мм –94,4 %;
г – К = 6 мм – 99,88%; b – зазор в соединении;
δ – смещение электрода от стыка

На рис.4 показано влияние величины катета шва на выход качественной продукции при условии базирования деталей по схеме №2 (см.табл.) и всех прочих условиях зафиксированных на рис.3. Расчёты показали, что с уменьшением катета шва от 6 мм до 3 мм сокращается выход годной продукции с 99,9 до 56 %. Очевидно, что экономия наплавленного металла за счет снижения катета шва требует повышения точности выполнения заготовительных операций.

С помощью имитационной модели оценивали влияние обучения наладчиков-программистов РТК на процент выхода качественной продукции. До сведения наладчиков было доведено, что области качества для тавровых соединений несимметричны (см.рис.2). В случае смещения проволоки на вертикальную стенку более чем на 1…1,5 мм на ней наблюдается подрез, что является браковочным признаком. Поэтому при программировании было рекомендовано смещать проволоку на горизонтальную полку, а не на вертикальную, что ранее отмечалось в работе [7]. Как показано на рис.5, программирование с учётом вышеописанного обучения привело к сокращению продукции, не соответствующей требованиям качества, с 9,8% до 5,1 %.

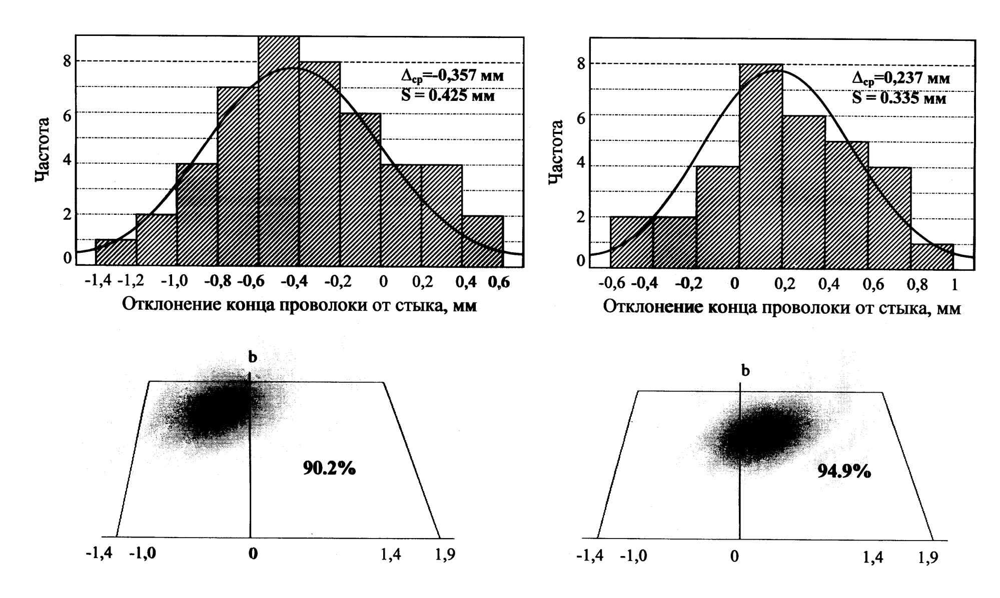


Рис.5. Влияние обучения наладчиков-программистов
на выход качественной продукции: а – до обучения; б – после обучения

Разработанная имитационная модель является открытой, полученные результаты хорошо визуализированы. Модель позволяет выявить влияние доминирующих факторов при определении путей совершенствования технологии роботизированной сварки.

Выводы. 1. Разработанная имитационная модель позволяет на различных этапах создания и эксплуатации роботизированного комплекса оценить долю сварных соединений, не соответствующих техническим требованиям, обусловленную неточностью направления электрода по стыку.

2. Модель позволяет выявить влияние доминирующих факторов и определить пути совершенствования технологии роботизированной сварки.

3. Программирование целесообразно вести не по произвольно взятым деталям, а по специально изготовленным шаблонам или по деталям, размеры которых близки к их математическому ожиданию.

Библиографический список

1. Куркин С.А., Николаев Г.А. Сварные конструкции. Технология изготовления, автоматизация и контроль качества в сварочном производстве: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа,1991. – 398 с.

2. Тимченко В.А., Сухомлин А.А. Роботизация сварочного производства. – Киев: Тэхника,1988. – 175 с.

3. Людмирский Ю.Г., Солтовец М.В., Юрова С.А. Условия обеспечения качественных сварных соединений при дуговой сварке неадаптивными роботами// Сварные конструкции и технология их изготовления: Сб. науч. ст. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 1998. – С 55-67.

4. Методика определения допустимого отклонения линии соединения от заданного положения при сварке / В.А.Тимченко, С.В.Дубовецкий, П.Ф. Федотов, К.П.Гурский // Автоматическая сварка. –1988. –№ 4. – С.32-35.

5. Куркин Н.С, Дриккер В.Е. Оценка предельных отклонений при дуговой роботизированной сварке тавровых соединений // Сварочное производство. – 1989. – № 2. – С.8-10.

6. Лебедовский М.С., Вейц В.П., Федотов А.И. Научные основы автоматической сборки. – М.: Машиностроение, 1985. – 316 с.

7. Вентцель Е.С. Теория вероятности. – М.: Наука, 1964. – 564 с.

Материал поступил в редакцию 13.10.06.

U.G. LUDMIRSKY, V.F. LUKJANOV, S.V. JAK

IMITATION MODEL OF FORECASTING QUALITY OF JOINTS AT WELDING BY NOT ADAPTIVE ROBOTS

The factors influencing quality of welded joints, executed by not adaptive robots, are presented. The imitating model of forecasting of quality welded joints is developed. The model allows to reveal influence of dominating factors and to define ways of perfection of technology of the robotized welding.

ЛЮДМИРСКИЙ Юрий Георгиевич (р.1940), профессор кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» ДГТУ, доктор технических наук (2002). Окончил РИСХМ (1962) по специальности «Оборудование и технология сварочного производства».
Научные интересы связаны с роботизацией сварочного производства, разработкой способов снижения сварочных деформаций, напряжений и повышения работоспособности сварных конструкций.
Автор более 120 работ.

ЛУКЬЯНОВ Виталий Федорович (р.1940), заведующий кафедрой «Машины и автоматизация сварочного производства» ДГТУ, доктор технических наук (1983). В 1962 году окончил РИСХМ по специальности «Оборудование и технология сварочного производства». Лауреат премии Правительства России в области науки (1998).
Научные интересы связаны с технологией производства сварных конструкций, конструкционной прочности, трещиностойкости и надежности сварных соединений.
Автор более 250 работ.

ЖАК Сергей Вениаминович (р.1930), заведующий кафедрой «Исследование операций» Ростовского государственного университета, доктор технических наук. Окончил РГУ в 1953 году по специальности «Механика».
Область научных интересов – разработка методов оптимизации и математического моделирования.
Опубликовано более 450 работ.